Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 13, No. 2, 2023, p. 135-146

Thermal and Mechanical Analysis of Rotary Kiln of Activated Carbon Producing Reactor

S. Naderi Parizi[1], R. Alimardani[2*], M. Soleimani[3], H. Mousazadeh[4]

1- Ph.D. Student of Mechanic of Biosystem, Department of Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Iran
2- Professor of Mechanic of Biosystem, Department of Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Iran
3- Associate Professor of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran
4- Associate Professor of Mechanic of Biosystem, Department of Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: rmardani@ut.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.71896.1055

Received: 23 August 2021 Revised: 11 December 2021 Accepted: 14 December 2021 Available Online: 14 December 2021	**How to cite this article:** Naderi Parizi, S., Alimardani, R., Soleimani, M., & Mousazadeh, H. (2023). Thermal and Mechanical Analysis of Rotary Kiln of Activated Carbon Producing Reactor. *Journal of Agricultural Machinery, 13*(2), 135-146. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2021.71896.1055

Introduction

Activated carbon has a wide range of applications as a porous material in the liquid or gas phase adsorption process. The physical process of activated carbon production is divided into two stages thermal decomposition and activation. In this study, only the activation stage has been studied because it is very important in the properties of activated carbon being produced.

The production of activated carbon from horticultural waste not only leads to cheap production and supply of many industrial and environmental necessities but also reduces the amount of the produced solid waste. Iran produces about 94,000 tons of pistachio husk annually, which is a good raw material for the production of activated carbon. The profitability index of activated carbon production in Iran is equal to 3.63, which in the case of export, the profitability index will be tripled.

Studies have shown that temperature, period, and activation gas flow are the key factors affecting burn-off and iodine number during activated carbon production. Among the various activators tested, steam was found to be the most efficient, with the fastest activation time. For pistachio crops, the minimum iodine number required for economic efficiency is 600 mg g^{-1}, while the highest specific surface area according to the BET test is 1062.2 m^2 g^{-1}.

Materials and Methods

A Mannesmann tube made of 10 mm thick steel was used to construct the rotating reactor. To minimize heat loss during operation, the kiln body was insulated with a ceramic blanket capable of withstanding temperatures up to 1400°C. The kiln had a length and diameter of 190 cm and 48 cm, respectively, and operated at a temperature of 600°C, requiring approximately 25 kWh of energy for heating. CATIA V5 R21 software was employed to design the device, while ANSYS R20 software was used for thermal and mechanical analysis. The rotary reactor was identified as a critical component due to the high levels of thermal and mechanical stress it experiences. To address these issues, a thermal and fluid analysis was conducted, followed by a mechanical analysis using the results from the prior step. Subsequently, experimental tests were performed on the actual model, and the results were analyzed using statistical methods, including the T-student test in IBM SPSS software.

The central heating unit and its surroundings were modeled using ANSYS CFX to obtain valuable information on fluid velocity, radiant properties, and heat transfer within the kiln and surrounding area at an operating temperature of 650°C. The analysis revealed uniform steam flow velocity between the kiln and the heating unit. To accommodate longitudinal expansion resulting from heat stress, taller rollers were employed to

allow freedom of movement in that direction, while the lateral movement was unrestricted. This arrangement allows the reactor length to increase under varying temperatures. The reactor's end was designed with grooves and pressure plates, incorporating abrasion and compression plates made from refractory fibers to effectively seal the device. Furthermore, telescopic movement of the parts compensates for expansion effects.

Results and Discussion

The operating temperature of the system was gradually increased to reduce thermal stresses in the reactor shell. This led to a maximum increment in a longitudinal increase of 11.75 mm. Results from five sets of experimental tests and five software analyses demonstrated no significant differences between the experimental and analytical results at a significance level of 5%. Based on the thermal contour analysis, the thickness of the insulation layer was determined to be 5 cm. To control the operating temperature of the device, two methods were employed: adjusting the flame length of the burner and using different types of exhaust outlets. These measures effectively reduced thermal stress on the device.

Conclusion

Thermal and mechanical analysis were useful methods for predicting heat distribution, thermal stresses, and potential dimensional changes in the activated carbon reactor. To compensate for possible alterations in the reactor's length and diameter, abrasive plates and friction washers were implemented. Careful control of fuel input to the burner and regulation of exhaust gas flow helped effectively reduce thermal stresses on the device.

Keywords: Activated Carbon, Activation, Pyrolysis, Steam

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۲، ص ١٤٦-۱۳۵

تحلیل حرارتی و مکانیکی کوره دوار رآکتور تولید کربن فعال

سجاد نادری پاریزی[۱]، رضا علیمردانی[۱*]، منصوره سلیمانی[۲]، حسین موسی زاده[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

چکیده

کربن فعال یک جاذب با ظرفیت جذب بالا بوده و در فرآیندهای جداسازی مختلف در فازهای مایع و گاز کاربرد دارد. فرآیند اصلی تولید کربن فعال، شامل پیرولیز ماده خام اولیه است و کربن تولیدشده در کوره فعال‌سازی، فعال می‌شود. باتوجه به اهمیت مرحله فعال‌سازی در خواص کربن فعال تولیدی، در این مقاله تحلیل حرارتی و مکانیکی کوره بخش فعال‌ساز مورد توجه قرار گرفت. مدل اولیه با نرم‌افزار CATIA V5 R27 طراحی و با نرم‌افزار ANSYS R20 تحلیل حرارتی و مکانیکی شد. تغییر طول‌های ناشی از حرارت کوره دوار و همچنین تلفات گرمایی و نحوه گردش جریان گرمایی در داخل کوره بررسی شد. به همین منظور ابتدا تحلیل حرارتی و سیالاتی کوره انجام، سپس نتایج با یک تحلیل مکانیکی ادغام گردید. کوره همراه با واحد گرمایش مرکزی و دامنه اطراف کوره در محیط ANSYS CFX مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که دمای دیواره داخلی حدود $600^{\circ}C$ است. با توجه به میزان دمای داخلی بدنه و با مهار کردن یک سمت کوره که در مدل واقعی توسط واشر جانبی اعمال می‌شود، میزان تغییر طول کوره در راستای محور افقی، معادل ۱۱/۷۵ mm محاسبه شد. سپس آزمون تجربی روی مدل واقعی انجام گرفت و نتایج حاصل از تحلیل آماری نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین نتایج مدل‌سازی و تجربی می‌باشد. در نهایت برای مهار آن از غلتک و تکیه‌گاه‌های مناسب، ورق‌های سایشی همراه با صفحات فشاری و برای مهار تلفات گرمایی از عایق سرامیکی ۵ سانتی‌متری استفاده گردید.

واژه‌های کلیدی: بخار آب، پیرولیز، تحلیل مکانیکی و حرارتی، فعال‌سازی، کربن فعال

مقدمه

کربن یا زغال فعال به‌عنوان یک ماده متخلخل کاربردهای مهم و گسترده‌ای دارد. این ماده از پیرولیز مواد گیاهی حاوی کربن تهیه می‌شود (Jadidian, Talaee, Mahdavi, & Homsi, 2016). کربن فعال به‌عنوان یک جاذب با ظرفیت جذب بالا و قیمت پایین، در فرآیندهای جذب از فاز مایع و گاز کاربردهای بسیار فراوانی دارد. از جمله کاربردهای این ماده در فاز مایع می‌توان به رنگ‌بری از محلول شکر، تصفیه آب آشامیدنی، پساب و فاضلاب، بازیافت یا جداسازی فلزات با ارزش و سنگین و در فاز گاز به استفاده در ماسک‌های گاز اشاره نمود (Ozsin, Yucel, & Behlulgil, 2011; Tehranizadeh, Ghazanfari moghadam, & Hashemipour rafsanjani, 2012).

هر ماده ارزانی که دارای مقدار زیادی کربن و مقدار کمی مواد معدنی باشد می‌تواند به‌عنوان ماده خام برای تولید کربن فعال استفاده شود. متداول‌ترین مواد خامی که برای تولید کربن فعال استفاده می‌شوند عبارتند از: چوب، برخی از گیاهان، زغال قیردار، زغال قهوه‌ای، لیگنین، پوسته نارگیل، پوسته میوه‌هایی چون فندوق، گردو، پسته و غیره (Chen, Chen, Sun, Zheng, & Fu, 2016; Hoseinzadeh & Rahmani, 2012). بخشی از مواد زائد تولیدی را مواد زائد باغبانی تشکیل می‌دهد که با توجه به وجود بیش از دو و نیم میلیون هکتار سطح زیر کشت محصولات باغی، مواد زائد باغبانی قابل‌توجهی در کشور تولید می‌شود (Sayyahzadeh, Ganjidoust, & Ayati, 2014). تولید کربن فعال از مواد زائد باغبانی، علاوه بر تولید ارزان قیمت این فرآورده و تامین بسیاری از نیازهای صنعتی و زیست‌محیطی، باعث کاهش حجم مواد زائد جامد تولیدی و نیل به توسعه پایدار می‌شود. برهمین اساس طی دهه‌های گذشته، در زمینه تولید کربن فعال از مواد زائد کم‌ارزش، تحقیقات متعددی صورت گرفته است (Patil & Kulkarni, 2012; Sayyahzadeh *et al.*, 2014). برای جذب مواد آلی فرار با غلظت کمتر از یک درصد وزنی،

۱- گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: rmardani@ut.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.71896.1055

می‌توان از بسترهای ثابت کربن فعال به‌عنوان روشی موثر و باصرفه استفاده کرد (Fatemi & Saadatmehr, 2005).

سرزمین ایران نه تنها منشا اصلی پسته به‌شمار می‌آید، بلکه کشت پسته از دیرباز در آن رایج بوده است. به طوری که در سال ۱۳۸۸، ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده و صادرکننده پسته در جهان بوده که حدود ۵۶٪ از تولید جهانی و حدود ۷۰٪ از صادرات جهانی پسته را به خود، اختصاص داده بود (NaderiParizi, Beheshti, & Roustapour, 2015). میزان تولید سالانه پسته در کشور طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به‌ترتیب ۲۱۰، ۲۲۵ و ۱۹۵ هزار تن گزارش شده است (Iran pistachio association, 2017). با توجه به این‌که حدود ۴۵٪ از این محصول را پوست سخت آن تشکیل می‌دهد، می‌توان پیش‌بینی نمود که سالانه در کشور حدود ۹۴ هزار تن مواد زائد فقط از همین یک نوع محصول یافت می‌شود. حجم عظیمی از پوست سخت (عمدتاً پسته‌های پوک)، در زمین‌های کشاورزی کشور نابود و یا با قیمت اندک در کشورهای همسایه به‌عنوان سوخت مصرف می‌شود. درصورتی‌که با تولید کربن فعال از این ضایعات می‌توان علاوه بر رفع نیاز صنایع داخلی، با صادرات آن برای کشور ارزآوری نیز ایجاد کرد. هر کیلوگرم کربن فعال، تقریباً حاصل فرآوری ۱۰ kg پوست سخت پسته می‌باشد. قیمت فروش هر کیلوگرم کربن فعال بسته به ویژگی‌های محصول بین ۲ تا ۵ دلار (متوسط ۴ دلار) می‌باشد. باتوجه به استفاده از گرمای حاصل از کربونیزاسیون پوست پسته، فرآیند بدون نیاز به مصرف سوخت خارجی قابل انجام و هزینه فرآوری فقط شامل هزینه‌های عملیاتی و حدود ۰/۱ دلار به ازای هر کیلوگرم ماده خام می‌باشد. با احتساب قیمت خرید پوست پسته (حدود ۰/۱ دلار به ازای هر کیلوگرم)، شاخص سودآوری تولید کربن فعال در ایران معادل ۳/۶۳ خواهد بود که در صورت صادرات، این شاخص به سه برابر خواهد رسید (Daneshmandi, Azizi, & Farush, 2014).

در تحقیقی با سنتز آزمایشگاهی پوست پسته و فعال‌سازی آن در راکتور دوار در مجاورت دی‌اکسید کربن و بخار آب، اثر سه عامل دمای فعال‌سازی، زمان ماند و دبی گاز اکسیدکننده بر روی میزان عدد یدی و میزان سوختن[1] بررسی شد. بر اساس مرجع استاندارد ASTM D4607-94، عدد یدی به‌صورت میلی‌گرم ید جذب شده به ازای یک گرم کربن فعال تعریف می‌شود. محققین بهینه دمای ۸۱۶/۵°C، زمان ماند ۴۰ min و دبی بخار ۴۷/۴ lit min^{-1} را در فعال‌سازی با بخار آب گزارش کردند (Bhati, Mahur, Dixit, & Choubey, 2013; Kamandari, Hashemipour rafsanjani, Najarzadeh, & Rezaei, 2012). حداقل عدد یدی لازم برای بهره‌وری اقتصادی کربن اکتیو ۶۰۰ mgr gr^{-1} می‌باشد (Aquino, Hernandez, & Capareda, 2007).

در پژوهشی مقایسه‌ای روی سختی کربن فعال تولیدی به روش فیزیکی و با استفاده از بخار آب از ضایعات کشاورزی مختلف انجام گرفت و در آن نشان داده شد که در عدد یدی یکسان، هسته هلو بالاترین و پوست پسته پایین‌ترین سختی را دارد. همواره با افزایش عدد یدی از میزان سختی کاسته می‌شود که به‌دلیل ایجاد سطح ویژه زیاد و سست شدن ساختار کربن فعال می‌باشد (Safa, Azimirad, Kamandari, & Bayat, 2016).

در پژوهشی که بر روی کربن فعال تولیدی به روش فیزیکی از باگاس زیتون انجام و بیان شد که دمای فعال‌سازی مهم‌ترین عامل در این فرآیند است. به‌طوری‌که فعال‌سازی در دمای ۹۰۰°C، ۳/۲ برابر سریع‌تر از دمای ۷۵۰°C انجام می‌شود. بیشترین میزان تخلخل در دمای ۹۰۰°C و زمان ماند ۴۵ min به میزان ۱۱۰۶ m^2 gr^{-1} بر اساس آزمون BET گزارش شد (Demiral, Demiral, Karabacakoĝlu, & Tümsek, 2011; Faramarzi, Kaghazchi, Ale Ebrahim, & Afshar Ebrahimi, 2015). آزمون BET بر پایه تئوری لانگمویر به‌منظور محاسبه سطح ویژه حفرات شامل میکرو، مزو و ماکرو حفره‌ها از ایزوترم‌های جذب و دفع نیتروژن مایع در دمای ۷۷ درجه کلوین به‌کار می‌رود (Bhati *et al.*, 2013).

پیرولیز یک فرآیند تجزیه حرارتی است که بدون اکسیژن انجام می‌شود. در فرآیند تجزیه حرارتی، مواد لیگنوسلولزی در محیط یک گاز بی‌اثر در دمای ۴۰۰ تا ۸۰۰°C قرار می‌گیرند و رطوبت و مواد فرار از آن‌ها خارج می‌شود. در اثر خروج مواد فرار، زغال به‌جا مانده تخلخل بسیار بالایی دارد که در واقع همان کربن فعال است (Aworn, Thiravetyan, & Nakbanpote, 2008; Tehranizadeh, 2012).

فرآیند فیزیکی (حرارتی) تولید کربن فعال را به دو مرحله می‌توان تقسیم کرد: مرحله اول تجزیه حرارتی[2] یا کربنیزاسیون[3] ماده اولیه و مرحله دوم فعال‌سازی[4] کربن. کربنیزاسیون فرآیندی است که در طی آن بر درصد کربن در ماده اولیه افزوده می‌گردد (Aquino *et al.* 2007). به‌عنوان مثال ۵۰ درصد وزنی چوب خشک کربن می‌باشد، که پس از کربنیزاسیون به ۹۰–۸۰ درصد وزنی می‌رسد (Byrne & Nagle, 1997). معمولاً برای اندازه‌گیری میزان فعال‌سازی از میزان اکسید شدن استفاده می‌گردد که برابر با درصد کاهش وزن ماده در مدت زمان فعال‌سازی نسبت به وزن کربن است (Lyubchik, Benaddi, Shapranov, & Beguin, 1997). بخار آب، دی‌اکسید کربن و مخلوط آن‌ها، متداول‌ترین گازهای مصرفی در فرآیند

1- Burn off

2- Thermal decomposition
3- Carbonization
4- Activation

اکسیداسیون در دمای بالا (فعال‌سازی) هستند. مطالعات سینتیکی نشان می‌دهد که سرعت فعال‌سازی توسط بخار آب هشت بار بیش از دی‌اکسید کربن می‌باشد (Ullmann *et al.*, 1985).

با توجه به مطالب ذکر شده، تخلخل محصول نهایی به عوامل متعددی نظیر نوع ماده خام، شرایط کربونیزاسیون، نوع عامل فعال‌ساز، دما، زمان فعال‌سازی و نسبت بخار به ماده ورودی[1] بستگی دارد. نبود دانش فنی در کنترل دقیق این عوامل از جمله مشکلات پیش روی سامانه‌های موجود بوده و دلیلی بر نافرجام ماندن طرح‌های انجام گرفته در کشور است. فرآیند ابتدایی تولید کربن فعال، شامل پیرولیز ماده خام اولیه بوده و زغال تولیدشده در مهم‌ترین مرحله تولید (کوره فعال‌سازی) فعال می‌شود. لذا به‌دلیل پرهزینه بودن ساخت کوره کربنیزاسیون و تاثیر جزیی مرحله کربنیزاسیون در کیفیت محصول خروجی، در این تحقیق از ساخت مجموعه کربنیزاسیون صرف‌نظر شده و مواد اولیه به‌صورت زغال خروجی مرحله کربنیزاسیون از صنایع کشور تهیه می‌شود و پژوهش بر روی مرحله فعال‌سازی متمرکز می‌شود. در این مقاله تحلیل حرارتی و مکانیکی واحد کوره بخش فعال‌ساز مورد توجه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

شکل ۱ نمای کلی از خط تولید پیوسته کربن فعال به روش فعال‌سازی فیزیکی با بخار آب را نمایش می‌دهد که در کشور نصب شده و درحال بهره‌برداری است. شکل ۲ نمای طرح پیشنهادی بهینه‌شده خط تولید فوق است که سامانه‌های کنترلی لازم در آن تعبیه و در محیط نرم‌افزار کتیا طراحی شده است. سامانه توزین دینامیک که در ورودی و خروجی طرح پیشنهادی تعبیه شده، قابلیت تعیین دبی جرمی مواد را داشته و می‌توان علاوه به محاسبه میزان بازده[2] کلی خط، مقدار نسبت بخار به کربن را نیز در فرآیند کنترل کرد. همچنین سامانه تغییر زاویه طولی باعث تغییر زمان ماند مواد داخل رآکتور، بدون تغییر در سرعت چرخش را می‌دهد.

با توجه به ملاحظات موجود در بحث دمای کارکرد و نوع مواد ورودی و همچنین وجود بخار آب و پایین بودن میزان گوگرد در مجموعه کوره، در تحقیقات گذشته، استفاده از فلز استیل نوع ۳۱۰ برای بدنه اصلی کوره پیشنهاد شده است. اما با توجه به محدودیت‌های تامین و قیمت بسیار بالای آن در بازار، از لوله مانیسمان فولادی با ضخامت ۱۰ mm استفاده شد که قابلیت تحمل دمای لازم جهت اکتیواسیون را داشته و فقط از نظر دوام با آلیاژ اصلی متفاوت است که با توجه به آزمایشی بودن طرح، جوابگوی نیازهای پروژه می‌باشد. به دلیل کارکرد کوره در دمای بالا و افزایش ابعاد قابل ملاحظه کوره، ساز وکار مناسبی برای این موضوع به‌کار گرفته شد. نمایی از طرح پیشنهادی برای این منظور در شکل ۳ دیده می‌شود.

به‌منظور کاهش هدررفت انرژی حرارتی، بدنه کوره توسط یک پوسته مناسب احاطه می‌شود. سطح داخلی این پوسته از عایق نسوز پتوی سرامیکی با تحمل دمایی مناسب (حدود ۱۴۰۰°C) که با یک روکش آلومینیومی مجهز شده پوشیده شده است. قسمت‌های تحتانی این بدنه بخشی از شاسی کوره را شامل می‌شود که به همراه کوره زاویه گرفته و در ایجاد سرعت‌های متفاوت حرکت مواد شرکت خواهد کرد. به دلیل نیاز به یکنواخت بودن تغذیه مواد در هنگام ورود به کوره، از سامانه تغذیه مارپیچی (یا نوار نقاله) استفاده می‌شود. طول کوره ۱۹۰ cm و قطر آن ۴۸ cm درنظر گرفته شد. در این صورت با توجه به ۱۰٪ پرشدگی کف کوره، وزن مرده مواد در داخل کوره حدود ۶ kg می‌باشد. دبی مواد خروجی (ظرفیت اسمی تولید) با توجه به سرعت چرخش و زاویه طولی کوره متغیر بوده که با فرض سرعت دورانی حدود ۳ rpm و زاویه ۳درجه‌ای نسبت به افق، به ظرفیت تولید ۲ $kg\ hr^{-1}$ می‌رسد.

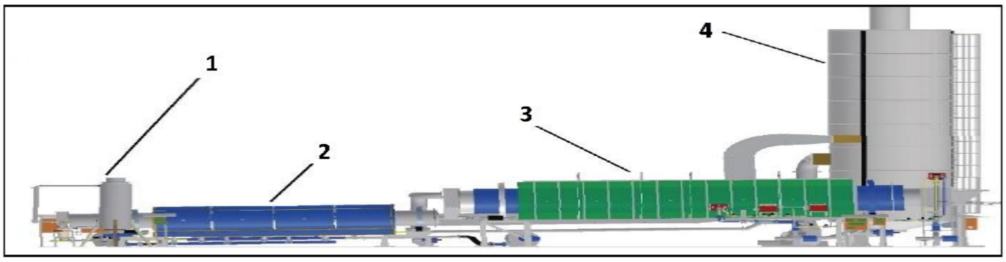
حداکثر دمای بدنه کوره حین عملیات فرآوری به حدود ۱۰۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد، اما دمای عملیاتی حدود ۶۰۰°C روی محصول خواهد بود. که برای تامین این دما نیاز به صرف حدود kWh ۲۵ انرژی در واحد گرمایش می‌باشد. به منظور تولید بخار مورد نیاز کوره اکتیواسیون، نیاز به سامانه‌ای برای تولید، انتقال و کنترل دقیق دبی بخار ورودی احساس می‌شود. باتوجه به نیاز به ثابت بودن نسبت بخار/کربن ورودی کوره همواره دبی بخار ورودی به کوره به تناسب دبی مواد ورودی قابل تغییر می‌باشد. همچنین به دلیل دمای کارکردی بالا و به حداقل رساندن تنش‌های حرارتی در پوسته رآکتور، افزایش دما باید به‌صورت مرحله‌ای انجام گیرد. کنترل وضعیت کارکرد قسمت‌های مختلف دستگاه توسط کنترلر مدل MEGA R3 2560 ساخت شرکت آردوینو کشور ایتالیا انجام گرفت. مجموعه تابلوی کنترل مطابق شکل ۴ وظیفه پایش و کنترل پارامترهای دما، سرعت دورانی، زاویه طولی رآکتور، وضعیت تزریق بخار، دبی جرمی مواد ورودی و سایر قسمت‌های دستگاه را بر عهده دارد.

به‌منظور مدل‌سازی دستگاه از نرم‌افزار CATIA V5 R21 و برای تحلیل حرارتی و مکانیکی از نرم‌افزار ANSYS R20 استفاده شد. بخش هدف دستگاه کوره دوار می‌باشد زیرا بیشترین تنش‌های حرارتی و مکانیکی متوجه این بخش می‌باشد و برای ارائه یک راهکار مهار این تنش‌ها نیاز به محاسبه تنش‌ها و تغییر طول‌های ناشی از حرارت می‌باشد. به همین منظور ابتدا تحلیل حرارتی و سیالاتی کوره انجام و سپس نتایج تحلیل محیط Fluid flow با یک تحلیل مکانیکی در محیط Static structural کوپله گردید.

برای این منظور مطابق شکل ۶، کوره (۲) همراه با واحد گرمایش مرکزی (۳) و دامنه اطراف کوره (۱) در محیط ANSYS CFX

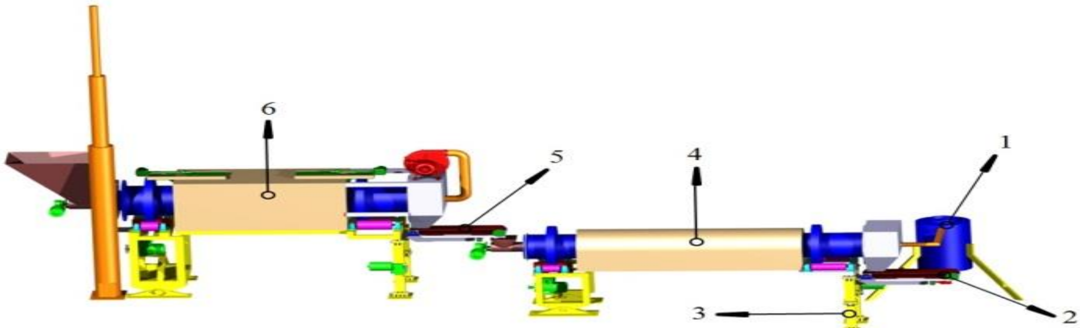
1- Steam/Char
2- Yield

مدل‌سازی شد. در مجرای ورودی و خروجی، سرعت سیال $5\ cm\ s^{-1}$، خواص تابشی و انتقال گرمای کوره و دامنه اطراف کوره اعمال و دمای واحد گرمایش $600^{\circ}C$ که طبق تحقیقات انجام گرفته و با توجه به تامین حرارت مورد نیاز از داخل راکتور دمای مطلوب می‌باشد به‌عنوان ورودی‌های مساله در نظر گرفته شد. فضای بین کوره و واحد گرمایش (۵) بخار آبی با سرعت یکنواخت در جریان می‌باشد. در شکل ۵ کانتور دما بین واحد گرمایش و بدنه داخلی کوره نمایش داده شده است. از آن‌جایی‌که جداره خارجی کوره عایق‌بندی شده است. از تلفات گرمایی از بدنه به بیرون از طریق هدایت حرارتی صرف‌نظر شده است.



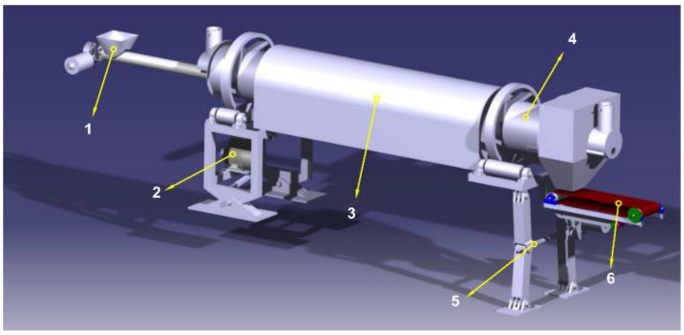
شکل ۱– خط تولید کربن فعال از پوست پسته (۱) بخارساز، (۲) کوره اکتیواسیون، (۳) کوره کربنیزاسیون، (۴) اکسیداسیون

Fig.1. Activated carbon production line from pistachio husk (1) Steam generator, (2) Activation kiln, (3) Char kiln, (4) Oxidizer



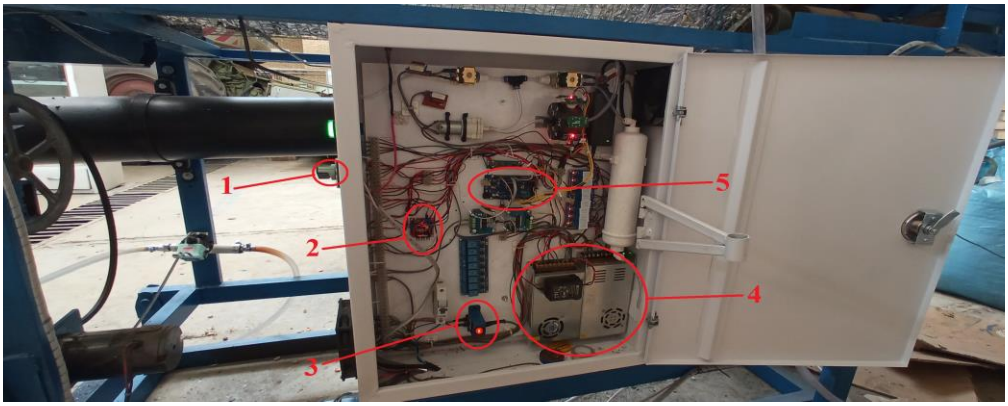
شکل ۲– طرح پیشنهادی خط تولید بهینه کربن فعال طراحی‌شده در نرم‌افزار CATIA: (۱) سامانه بخارساز، (۲) سامانه توزین دینامیک خروجی، (۳) سامانه تغییر زاویه طولی کوره، (۴) کوره فعال‌ساز، (۵) سامانه توزین دینامیک ورودی، (۶) کوره کربن

Fig.2. Proposed plan of the optimal activated carbon production line designed by CATIA software: (1) Steam generator system, (2) Outlet dynamic scaling system, (3) Variable kiln longitudinal angle system, (4) Activation kiln, (5) Inlet dynamic scaling system, (6) Char kiln



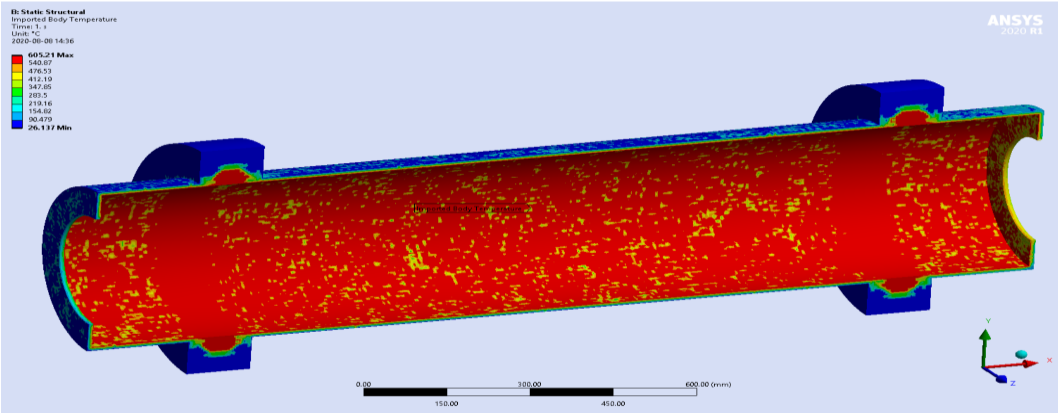
شکل ۳– واحد فعال‌ساز: (۱) واحد تغذیه، (۲) واحد تولید توان مکانیکی، (۳) پوشش عایق، (۴) استوانه گردان کوره، (۵) واحد تغییر زاویه طولی کوره، (۶) واحد توزین دینامیکی

Fig.3. Activator unit: (1) Feeder unit, (2) Mechanical power generation unit, (3) Insulation cover, (4) Rotary drum, (5) Variable kiln longitudinal angle unit, (6) Dynamic scaling unit



شکل ٤– تابلوی کنترل دستگاه: (۱) سوئیچ برق اصلی، (۲) درایور محرک کنترل شیر ورودی مشعل گازی، (۳) رله و نشانگر وضعیت کارکرد مشعل گازی، (۴) منابع تغذیه حسگرها و عملگرها، (۵) هسته کنترل مرکزی Arduino MEGA R3 2560

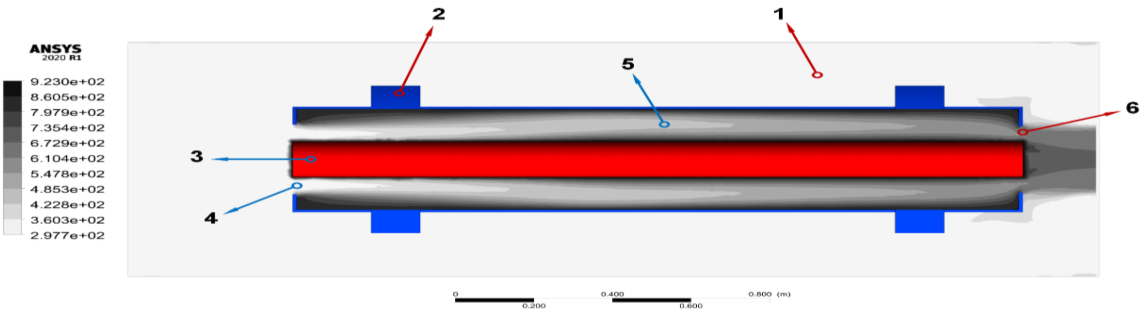
Fig.4. Device control panel: (1) Main switch, (2) Burner inlet valve actuator driver, (3) Relay and indicator of burner operation status, (4) Power supplies for sensors and actuators, (5) Arduino (MEGA R3 2560) as central processor unit



شکل ۵– مدل شبیه‌سازی شده کوره فعال‌ساز در محیط ANSYS CFX

Fig.5. Simulated model of activation kiln in ANSYS CFX environment

با توجه به وجود بخار آب در فضای بین دیواره داخلی کوره دوار و دیواره خارجی واحد تامین حرارت و حل مساله، دمای دیواره داخلی در حدود $600^{\circ}C$ به‌دست آمد. این توزیع دما در بدنه کوره بـه‌عنـوان بـار حرارتی برای تحلیل مکانیکی استفاده شد.



شکل ٦– وضعیت دیواره داخلی کوره در محدوده دمایی حدود $600^{\circ}C$: (۱) دامنه اطراف کوره، (۲) بدنه کوره، (۳) واحد گرمایش مرکزی، (۴) مجرای ورودی، (۵) بخار آب، (۶) مجرای خروجی

Fig.6. The condition of the inner wall of the kiln in the temperature range ($600^{\circ}C$): (1) Domain around the kiln, (2) Kiln body, (3) Central heat generation unit, (4) Charge duct, (5) Steam, (6) Discharge duct

نتایج و بحث

مقایسه تغییر طول کوره در نرم‌افزار و آزمون تجربی

برای فراهم نمودن حرکت طولی دستگاه در اثر حرارت و در واقع فراهم نمودن شرایط درجه آزادی در راستای طولی، از یک غلتک با طول بیشتر استفاده گردید و حرکت جانبی روی آن غلتک مهار نگردید. این موضوع اجازه انبساط طولی رآکتور را در دماهای مختلف فراهم می‌نماید. از طرفی انتهای رآکتور توسط شیارها و صفحات فشاردهنده طوری طراحی شده است که ضمن آب‌بندی مناسب، با کمک الیاف نسوز، قطعات در اثر انبساط به‌صورت تلسکوپی در داخل هم حرکت نمایند و اثرات انبساط را خنثی نمایند. شکل ۷ نمای کلی دستگاه پس از بازطراحی و ساخت را نشان می‌دهد.



شکل ۷– نمایی کلی از دستگاه بازطراحی شده: (۱) شیر کنترل دبی مشعل، (۲) مشعل گازی، (۳) محل قرارگیری حسگر دما، (۴) مخزن ورودی مواد

Fig.7. Overview of the redesigned device: (1) Flow control valve, (2) Burner, (3) Location of the temperature sensor, (4) Input material bin

نتایج حاصل از ۵ آزمون تجربی در بازه‌های زمانی مختلف و همچنین تحلیل در ۵ اندازه مختلف مش‌بندی (جدول ۱)، نشان از عدم اختلاف معنی‌دار بین نتایج تجربی و تحلیلی در سطح ۵ درصد دارد، بنابراین با دقت قابل‌قبولی می‌توان به نتایج حاصل از تحلیل استناد نمود. در جدول ۲ نتایج تحلیلی و تجربی آزمون جفتی t-student خروجی نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 26 ارائه شده است.

جدول ۱– نتایج تحلیلی و تجربی دمای مواد خروجی در دمای ۶۰۰ درجه کوره

Table 1- Analytical and experimental results of T-temperature of outlet materials in 600°C of kiln temperature

آزمون تجربی Experimental test	1	2	3	4	5
دمای مواد خروجی Product temperature (°C)	545	570	550	547	565
تعداد المان Number of elements	154800	240587	368470	487549	687954
دمای مواد خروجی Product temperature (°C)	568	570	565	564	564

جدول ۲– آنالیز Paired samples T-test خروجی از نرم‌افزار SPSS (در سطح معنی‌داری ۹۵٪)

Table 2- Paired samples T-test output from SPSS software (95% Confidence Interval of the Difference)

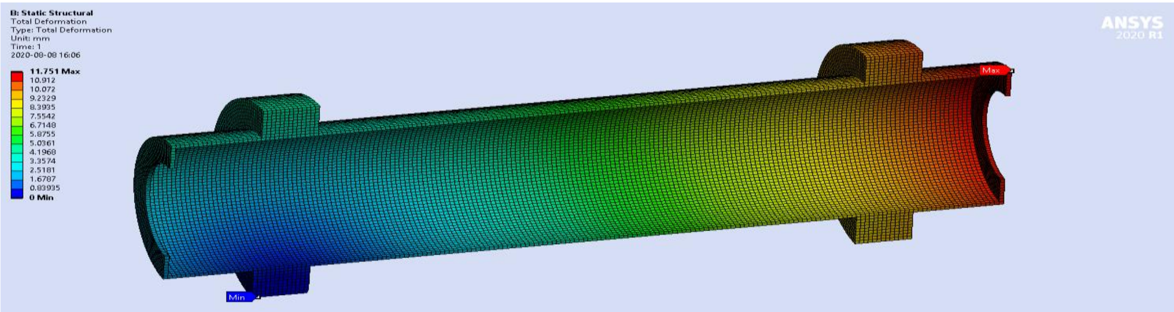
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	Lower	Upper	t	df	Sig. (2-tailed)
Experimental- Analytical	-.192	.175	.078	-.409	.0258	-2.44	4	.071

با توجه به میزان دمای داخلی بدنه به میزان $600^{\circ}C$ و با مهار کردن یک سمت کوره که در مدل واقعی توسط واشر جانبی اعمال می‌شود، میانگین افزایش ابعاد کوره در راستای محور طولی آن معادل با ۱۱/۷۵ mm به‌دست آمد (شکل ۸). گرایلی و همکاران در تحقیق خود روی لوله فولادی با قطر ۲۱۹ میلی‌متر، ضخامت ۸ میلی‌متر و طول ۳۸۱۰ میلی‌متر در دمای ۴۳۰ درجه سلسیوس به افزایش طول ۲۱ میلی‌متر رسیدند (Grayeli, Naghipour, & Panahi, 2018).

با توجه به نتایج به‌دست آمده، ملاحظه شد که بایستی سازوکار مناسبی جهت قابلیت افزایش طول رآکتور حین چرخش، طراحی و به‌کارگیری شود. انجام طراحی و ساخت به‌علت دوار بودن رآکتور و همچنین ایزوله بودن مجموعه از لحاظ عدم ورود اکسیژن از محدودیت‌های خاصی برخوردار است. اثرات ناشی از این تغییر طول، در طراحی کوره لحاظ شده و با توجه به آن تدابیری لحاظ گردید:

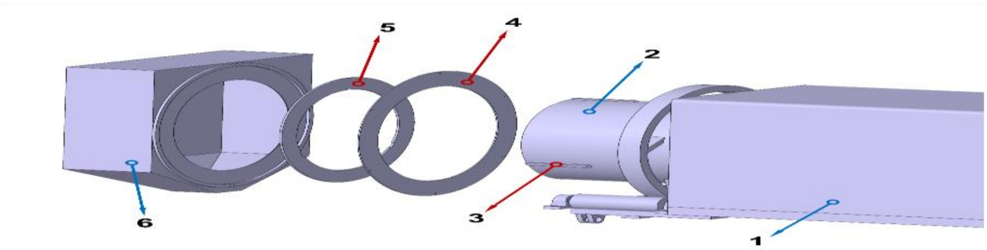
استفاده از غلتک و تکیه‌گاه‌های مناسب و طراحی شوت و دریچه خروجی مواد که باید به‌صورت ثابت در انتهای کوره قرار گیرد و خروجی آن همواره نقطه معینی باشد.

استفاده از ورق‌های سایشی که دارای شیار حرکت رآکتور باشند به همراه صفحات فشاری لازم در نقاطی از کوره که زائده‌های مربوط به این کار تعبیه شده‌اند اجباری خواهد بود (شکل ۹).



شکل ۸– کانتور تغییر شکل کوره ناشی از دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در دیواره داخلی کوره

Fig.8. Contour of internal kiln deformation at $600^{\circ}C$



شکل ۹– مکانیزم مهار اثرات تغییر شکل حرارتی: (۱) پوسته عایق کوره، (۲) کوره دوار، (۳) زائده‌های قفل‌کننده، (۴) صفحه فشاردهنده، (۵) صفحه سایشی، (۶) شوت خروجی

Fig.9. Thermal deformation control mechanism: (1) Kiln insulation cover, (2) Rotary drum, (3) Locking key, (4) Labyrinth ring, (5) Sliding ring, (6) Discharge chute

نتایج تحلیل کانتور حرارتی بیانگر آن بود که جهت جلوگیری از اتلاف حرارت و تلفات رسانشی، بایستی در اطراف کوره عایق‌بندی صورت گیرد. به این منظور از عایق سرامیکی با ضخامت ۵ cm در اطراف کوره استفاده گردید (شکل ۱۰).

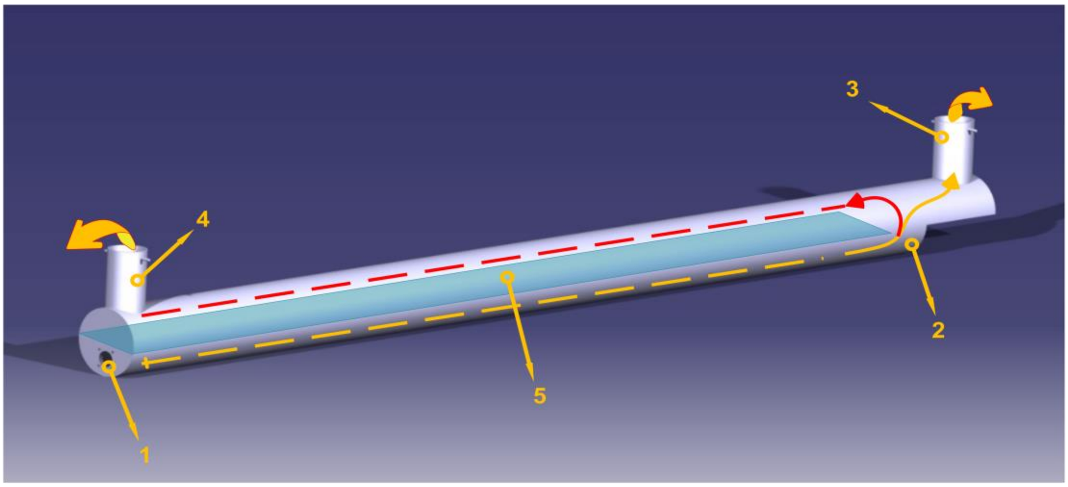
برای کنترل دمای عملکردی دستگاه، از دو ساز و کار استفاده شد:

- تغییر طول شعله مشعل گرمازا و نهایتاً تغییر حرارت تولیدی آن
- استفاده از حالات مختلف عملکردی دو نوع اگزوز در محدوده دمایی خاص.

در دماهای پایین‌تر اگزوز اول مورد استفاده قرار گرفته و اگزوز دوم بسته می‌شود. در دماهای بالا عکس این حالت رخ می‌دهد. این سازوکار تعبیه شده منجربه عملکرد مطلوب حرارتی شده و تیمارهای مطلوب را جهت کاهش تنش‌های حرارتی بر روی مواد داخل کوره اعمال می‌نماید (شکل ۱۱).



شکل ۱۰– عایق‌بندی کوره
Fig. 10. Kiln insulation



شکل ۱۱– منبع حرارتی مرکزی و اگزوزهای دوگانه تعبیه شده برای شرایط مختلف حرارتی: (۱) محل نصب مشعل گرمازا، (۲) لوله گرمایش، (۳) خروجی اول با حداقل انتقال حرارت، (۴) خروجی دوم با حداکثر انتقال حرارت، (۵) صفحه جداکننده
Fig.11. Central heat generator and its dual exhausts designed for different thermal conditions: (1) Burner position, (2) Heating Pipe, (3) First exhaust for minimum heat exchange, (4) Second exhaust for maximum heat exchange, (5) Separation Plate

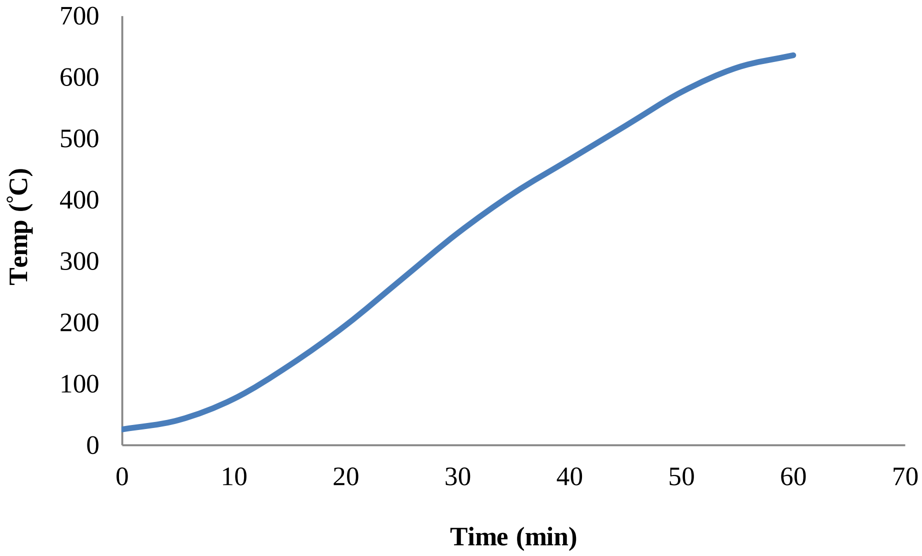
منحنی تغییرات درجه حرارت بدنه رآکتور در شکل ۱۲ نشان داده شده است. اگزوز اول در دمای ۱۰۰ و اگزوز دوم در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس فعال شدند. در ابتدا مشعل با حداقل توان (۲۰ درصد) شروع به‌کار کرد، در این حالت اگزوز دوم بسته و اگزوز اول کاملا باز بود. در دمای ۱۰۰ درجه اگزوز اول بسته و اگزوز دوم باز شد. در دمای ۳۰۰ درجه، به‌تدریج (هر ۴ درجه سلسیوس افزایش دما، ۱ درصد افزایش توان مشعل) توان مشعل به ۱۰۰ درصد توان اسمی خود رسید. یکنواختی افزایش دما و جلوگیری از ایراد تنش‌های حرارتی در بدنه رآکتور باعث افزایش عمر آن می‌شود. افزایش دمای رآکتور به بیشتر از دمای تعیین‌شده‌ی ۶۰۰ درجه سلسیوس به‌علت داغ شدن بیش از حد کوره داخلی و انتشار حرارت آن حتی بعد از کاهش طول شعله در مشعل گرمازا می‌باشد.

نتیجه‌گیری

پس از طراحی دستگاه در نرم‌افزار CATIA و ساخت سامانه مطابق طرح بهینه‌شده، تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی رآکتور در نرم‌افزار ANSYS انجام و تنش‌های وارده با توجه به درجه آزادی سامانه تعیین شد. میزان افزایش طول کلی رآکتور ۱۱/۷۵ mm و دمای سطح محصول در زمانی که دمای واحد گرمایش مرکزی ۶۰۰°C باشد حدود ۵۶۵°C برآورد شد. مقادیر تجربی به‌ترتیب ۱۱/۵ mm و ۵۵۰°C به‌دست آمد. ضخامت لایه عایق ۵ cm و جنس آن عایق سرامیکی مجهز به لایه آلومینیومی انتخاب شد. سازوکار مناسبی در قسمت انتهایی کوره جهت قابلیت ازدیاد طول طراحی و به‌کار گرفته شد. همچنین به‌منظور کاهش تنش‌های حرارتی و

مکانیکی به بدنه رآکتور، از سامانه انتقال حرارت مرحله‌ای استفاده گردید.

نتایج نشان داد که نتایج تحلیل نرم‌افزاری با خطای ۳ درصد با نتایج آزمون تجربی تفاوت دارند. درنتیجه مقادیر نرم‌افزاری قابل‌استناد بوده و مبنای اصلاحات و تغییرات در ساخت دستگاه قرار گرفت.



شکل ۱۲– منحنی افزایش دمای رآکتور با استفاده از روش‌های دوگانه کنترل حرارت

Fig.12. Reactor temperature curve using dual heat control methods

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب تشکر خود را از همه اساتید و دوستانی که در انجام این پروژه به هر نحوی سهیم بوده‌اند، اعلام می‌دارد: مدیریت محترم عامل شرکت خدمات فنی و مهندسی هزار صنعت، مدیریت محترم عامل و هیئت مدیره محترم شرکت کربن فعال پارس رفسنجان، جناب آقای مهندس سروش توتونچیان و جناب آقای دکتر آیدین ایمانی.

References

1. Aquino, F. L., Hernandez, J. R., & Capareda, S. C. (2007). Elucidating the solid, liquid and gaseous products form pyrolysis of cotton gin trash. *ASABE Annual International Meeting*, *12*(07). https://doi.org/10.13031/2013.23321
2. Aworn, A., Thiravetyan, P., & Nakbanpote, W. (2008). Preparation and characteristics of agricultural waste activated carbon by physical activation having micro- and mesopores. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *82*(2), 279-285. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.04.007
3. Bhati, S., Mahur, J. S., Dixit, S., & Choubey, O. N. (2013). Surface and adsorption properties of activated carbon fabric prepared from cellulosic polymer: Mixed activation method. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, *34*(2), 569-573. https://doi.org/10.5012/bkcs.2013.34.2.645
4. Byrne, C. E., & Nagle, D. C. (1997). Carbonization of wood for advanced materials applications. *Carbon*, *35*(2), 259-266. https://doi.org/10.1016/S0008-6223(96)00136-4
5. Chen, D., Chen, X., Sun, J., Zheng, Z., & Fu, K. (2016). Pyrolysis polygeneration of pine nut shell: Quality of pyrolysis products and study on the preparation of activated carbon from biochar. *Bioresource Technology*, *216*, 629-636. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.107
6. Daneshmandi, M., Azizi, M., & Farush, R. (2014). The Study on Physical, Chemical and Biochemical Characteristics of Pistachio (*Pistacia vera* L. cv. Daneshmandi) and Its Comparison to Some Commercial Cultivars From Iran. Journal of Horticultural Science, 28(1), 10-17. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.34996
7. Demiral H., Demiral, I., Karabacakoĝlu, B., & Tümsek, F. (2011). Production of activated carbon from olive bagasse by physical activation. *Chemical Engineering Research and Design*, *89*(2), 206-213.

https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.05.005

8. Faramarzi, A. H., Kaghazchi, T., Ale Ebrahim, H., & Afshar Ebrahimi, A. (2015). Experimental investigation and mathematical modeling of physical activated carbon preparation from pistachio shell. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *114*, 143-154. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.012
9. Fatemi, S., & Saadatmehr, A. (2005). Mathematical modeling of dynamic and multicomponent adsorption of light hydrocarbons in fixed activated carbon substrate. *Journal of the College of Engineering*, *39*(2). (in Persian with English abstract).
10. Grayeli, M., Naghipour, M., & Panahi, S. (2018). *Influence of friction coefficient and thermal expansion coefficient on composite sections under fire loading*. Fourth National Conference on Civil Engineerind and Architecture with emphasis on indigenous technologies of Iran. Tehran. (in Persian).
11. Hoseinzadeh, E., & Rahmani, A. (2012). Producing activated carbon from scrap tires by thermo-chemical method and evaluation its efficiency at removal racid black1 dye. *Iranian Journal of Health and Environment*, *4*(4), 427-438. (in Persian with English abstract).
12. Iran pistachio association, Statistical archive. (2017). Retrieved from www.iranpistachio.org (in Persian with English abstract).
13. Jadidian, F., Talaee, M., Mahdavi, S., & Homsi, A. (2016). Investigation on thermal energy and activated carbon production from Furfural residue. *Journal of Forest and Wood Product*, *69*(3), 571-583. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jfwp.2016.59896
14. Kamandari, H., Hashemipour rafsanjani, H., Najarzadeh, H., & Rezaei, H. (2012). Investigation of the synthesis of physically activated carbon in a rotating reactor. pp. 1-5. (in Persian with English abstract).
15. Lyubchik, S. B., Benaddi, H., Shapranov, V. V., & Beguin, F. (1997). Activated carbons from chemically treated anthracite. *Carbon*, *35*(1), 162-165. https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)81121-9
16. NaderiParizi, S., Beheshti, B., & Roustapour, O. (2015). Investigation of pistachio (*Kalleh Ghoochi* v.) drying kinetics in a new intelligent rotary dryer under vacuum. *Journal of Food Science and Technology*, *13*(54), 135-143. (in Persian with English abstract).
17. Ozsin, G., Yucel, H., & Behlulgil, A. (2011). Production and characterization of activated carbon from pistachio-nut shell. Middle easr technical univerity.
18. Patil, B. S., & Kulkarni, K. S. (2012). Development of high surface area activated carbon from waste material. *International Journal of Advanced Engineernig Research and Studies*, *1*(2), 2249-8974.
19. Safa, S., Azimirad, R., Kamandari, H., & Bayat, F. (2016). Comparison of hardness of activated carbon synthesized from agricultural wastes by physical method. pp. 1-9.
20. Sayyahzadeh, A., Ganjidoust, H., & Ayati, B. (2014). Optimization of activated carbon production from almond shell for adsorption of soluble oil containants. *Journal of Water and Wastewater*, *25*(5), 108-117. (in Persian with English abstract).
21. Tehranizadeh, M., Ghazanfari moghadam, A., & Hashemipour rafsanjani, H. (2012). Pyrolysis of date palm trunks to Produce Active Carbon. *Journal of Agricaltural Engineering Research*, *13*(3), 77-88. (in Persian with English abstract).
22. Ullmann, F., Gerharts, W., Yamamoto, Y. S., Campbell, F. T., Pfefferkorn, R., & Rounsaville, J. F. (1985). Ullmann’s encyclopedia of industrial chemistry. Weinheim: VCH.